

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problems Mailbox.**

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Patentschrift  
10 DE 197 02 335 C 1

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
B 23 K 26/08  
A 61 F 9/013

21 Aktenzeichen: 197 02 335.5-34  
22 Anmeldetag: 23. 1. 97  
43 Offenlegungstag: -  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 27. 8. 98

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

WaveLight Laser Technologie GmbH, 91058  
Erlangen, DE

74 Vertreter:

Patent- und Rechtsanwälte Wuesthoff & Wuesthoff,  
81541 München

72 Erfinder:

Strohm, Fredy, 90542 Eckental, DE; Donitzky,  
Christof, 90542 Eckental, DE; Reindl, Max, 90562  
Heroldsberg, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

US 55 20 679 A

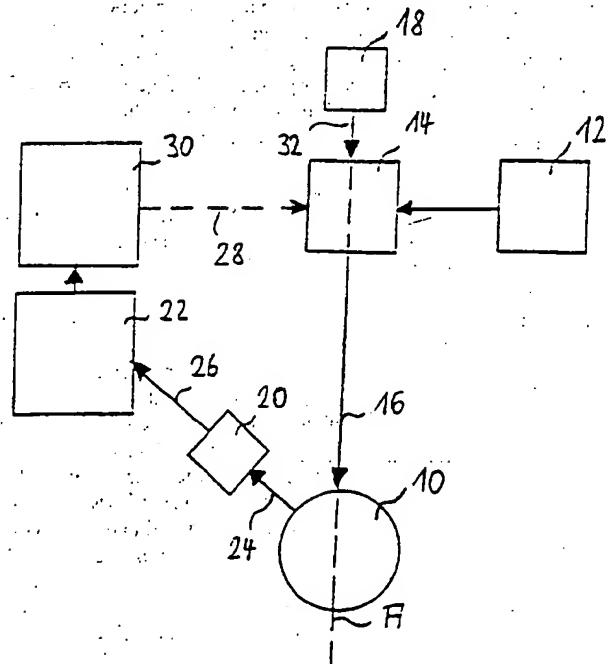
GOBBI, P.G. (u.a.): Automatic Eye Tracker for  
Excimer Laser Photorefractive Keratectomy, In:  
Suppl. to Journal of Refractive Surgery,  
Mai/June 1995, S. 337-342;

MANN, F. (u.a.): Optical profilometry of poly  
(methylmethacrylate) surface after reshaping  
with a scanning photorefractive keratectomy  
(SPRK) system, In: Applied Optics, H. 19,  
July 1996, S. 338-3346;

MARSHALL, G.F.: Scanner refinements inspire  
new uses, In: Laser Focus World, June 1994,  
S. 57-63;

54 Vorrichtung für die Materialbearbeitung mit einem gepulsten Laser

57 Eine Vorrichtung für die Materialbearbeitung weist einen gepulsten Laser (12) auf, dessen Strahlung (16) auf ein zu bearbeitendes Objekt (10) gerichtet wird. Bei dem Objekt kann es sich insbesondere um die Cornea eines menschlichen Auges handeln. Eine Einrichtung (14, 20, 22, 30) ist vorgesehen, um den Strahl (16) dann, wenn sich das Objekt relativ zu einer Bezugsachse (A) bewegt, nachzuführen. Eine Bewegung des Objektes wird mit einer Bildaufnahmeeinrichtung (20) ermittelt. Entsprechend einer Bewegung des Objektes relativ zur Bezugsachse (A) steuert eine Steuerung (30) eine Strahlführungseinrichtung (14), zum Beispiel einen galvanometrischen Abtaster. Die Bildfolgefrequenz, mit der die Kamera (20) Bilder aufnimmt, ist in Abhängigkeit von einer Änderung der Pulsfolgefrequenz der Laserstrahlung (16) einstellbar. Dabei ist die Bildfolgefrequenz mindestens zweimal so groß wie die Pulsfolgefrequenz.



DE 197 02 335 C 1

DE 197 02 335 C 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung für die Materialbearbeitung mit einem gepulsten Laser, dessen Pulsfolgefrequenz einstellbar ist und dessen Strahl auf das zu bearbeitende Objekt gerichtet wird, und mit einer Einrichtung zum Nachführen des Strahls dann, wenn sich das Objekt relativ zu einer Bezugsachse bewegt, wobei die Einrichtung zum Nachführen eine Bildaufnahmeeinrichtung mit einer Bildwiederholrate größer als 60 Hz, die das Objekt mit einer Bildfolgefrequenz aufnimmt, eine Bildverarbeitungseinrichtung, die aufeinanderfolgende Bilder verarbeitet, um die Bewegung des Objektes zu ermitteln, und eine Steuerung zum Abgeben eines einer Objektbewegung entsprechenden Signals an eine optische Einrichtung zum Steuern des Laserstrahls aufweist.

Insbesondere kann eine solche Vorrichtung für die sogenannte PRK (Foto-Refraktive Keratektomie, englisch: Photorefractive Keratectomy) verwendet werden, d. h. ein Verfahren zur Korrektur der Fehlsichtigkeit des menschlichen Auges, bei dem insbesondere die Cornea neu geformt wird. Zum Stand der Technik der PRK wird auf folgende Dokumente des Standes der Technik verwiesen: Gobbi, Pier Giorgio et al.: Automatic Eye Tracker for Excimer Laser Photorefractive Keratectomy; Supplement to Journal of Refractive Surgery, Vol. 11, Mai/Juni 1995; weiterhin: Lin, J. T., Ophthalmic Surgery Method Using Non-Contact Scanning Laser, U. S. Patent 5.520.679, 28. Mai 1996; und Manns, Fabrice, et al., Optical profilometry of poly(methylmethacrylate) surfaces after reshaping with a scanning photorefractive keratectomy (SPRK) system, Zeitschrift APPLIED OPTICS, Vol. 35, NO. 19, 1. Juli 1996.

Als Laserstrahlungsquelle für die PRK sind, neben anderen Lasern (Excimer), insbesondere Er: YAG-Festkörperlaser bekannt.

Bei der PRK wird Material der Hornhaut abgetragen. Der Abtrag ist eine Funktion der auf die Hornhaut auftreffenden Energiedichte (Energie pro Flächeneinheit) des Laserstrahls. Es sind unterschiedliche Techniken für die Strahlformung und Strahlführung bekannt, so zum Beispiel die sogenannte Schlitz-Abtastung (slit scanning), bei der die Strahlung mittels eines bewegten Schlitzes über den zu bearbeitenden Bereich geführt wird, das sogenannte Fleck-Abtasten (spot-scanning), bei dem ein Strahlungsfleck mit sehr geringen Abmessungen über das abzutragende Gebiet geführt wird, und auch die sogenannte Vollabtragung (full-ablation), bei der die Strahlung großflächig über den gesamten abzutragenden Bereich eingestrahlt wird und wobei die Energiedichte sich über das Strahlprofil ändert, um den gewünschten Abtrag der Hornhaut zu erreichen. Der Stand der Technik kennt für die genannten Strahl-Führungen jeweils geeignete Algorithmen zum Steuern der Strahlung, um die Hornhautoberfläche so abzutragen, daß die Cornea schließlich den gewünschten Krümmungsradius erhält.

Das vorstehend bereits erwähnte "Fleck-Abtasten" (spot-scanning) verwendet einen auf einen relativ kleinen Durchmesser (0,1–2 mm) fokussierten Laserstrahl, der mittels einer Strahlführungseinrichtung auf verschiedene Stellen der Hornhaut gerichtet und durch einen sogenannten Abtaster (scanner) sukzessive so bewegt wird, daß letztlich der gewünschte Abtrag von der Cornea erreicht wird. Bei der PRK sind insbesondere sogenannte galvanometrische Abtaster (Scanner) verwendbar (vgl. Aufsatz G. F. Marshall in LASER FOCUS WORLD, Juni 1994, S. 57).

Ein besonderes Problem bei der PRK ist die relative Positionierung von Laserstrahl und Auge. Aus medizinischen Gründen ist eine mechanische Fixierung des Auges nicht befriedigend. Der Stand der Technik kennt deshalb eine so-

genannte optische Fixierung, bei der mit dem materialbearbeitenden Laserstrahl in der Regel koaxial ein sogenannter Fixierstrahl verwendet wird. Der Patient ist angehalten, genau auf den durch den Fixierstrahl definierten Punkt zu schauen, damit das Auge während der gesamten Operation immer die gleiche Position einnimmt. Allerdings gelingt dies nicht, jedenfalls nicht mit hinreichender Zuverlässigkeit, so daß es zu Bewegungen des Auges kommt, die den gesamten Ablationsvorgang massiv beeinträchtigen können.

Der Stand der Technik (s. o.) kennt deshalb sogenannte "Eye-Tracker", also Einrichtungen, die Bewegungen des Auges ermitteln, um dann den für die Ablation verwendeten Laserstrahl entsprechend den Augenbewegungen zu steuern (nachzuführen). Derartige "Eye-Tracker" nehmen in schneller Folge Bilder des Auges auf und diese werden verarbeitet, um die Bewegungen des Auges zu ermitteln. Aus aufeinanderfolgenden Bildern (zum Beispiel zwei aufeinanderfolgenden Bildern) kann eine Veränderung der Position des Auges (Pupillenlage) ermittelt werden. Entsprechend der Augenbewegung läßt sich dann der Ablations-Laserstrahl mittels geeigneter Strahlführungseinrichtungen (z. B. dem oben genannten galvanometrischen Scanner) nachführen.

Es sind im Stand der Technik auch sogenannte passive "Eye-Tracker"-Systeme bekannt, bei denen zwar eine Bewegung des Auges erkannt wird, die Nachführung aber unterbleibt. Vielmehr wird für die Zeitspannen, in denen das Auge aus der gewünschten Soll-Position bewegt ist, der Materialabtrag ausgesetzt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung für die Materialbearbeitung mit gepulsten Laserstrahlen der eingangs genannten Art so auszugestalten, daß eine optimale Strahlnachführung ermöglicht ist.

Erreicht wird dieses Ziel bei der oben beschriebenen Vorrichtung dadurch, daß bei einer Änderung der Pulsfolgefrequenz in Bereichen größer als 100 Hz die Bildfolgefrequenz synchron dazu veränderbar ist, wobei die Bildfolgefrequenz immer mindestens zweimal so groß ist wie die Pulsfolgefrequenz. Je höher die Bildfrequenz im Verhältnis zur Repetitionsrate des Lasers ist, umso schneller und zuverlässiger können Bewegungen des Objektes erfaßt werden.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann bevorzugt in der oben definierten PRK eingesetzt werden, ist jedoch nicht auf diese Anwendung beschränkt. Vielmehr kann die Vorrichtung zur Materialbearbeitung eines beliebigen Objektes verwendet werden, wenn die Relativposition zwischen dem bearbeitenden Laserstrahl und dem Objekt unerwünschten Veränderungen unterliegt. Eine andere Anwendung der Erfindung ist die Bearbeitung einer Vielzahl von gleichartigen Objekten, die sich an einer Bearbeitungsstation vorbei bewegen, zum Beispiel Objekte, die auf einem Fließband abgelegt sind und in gleichartiger Weise mittels eines gepulsten Lasers bearbeitet werden.

Bei Anwendung in der PRK wird für die Strahlnachführung das Auge mit Infrarotstrahlung (nicht zu verwechseln mit der eigentlichen Laserstrahlung für die Materialbearbeitung) bestrahlt. Eine Kamera, insbesondere eine Festkörper-Bildkamera (CCD-Kamera) nimmt durch die IR-Strahlung erzeugte Bilder des Auges, insbesondere der Pupille auf, und zwar in Form des Hell/Dunkel-Kontrastes. Dabei ermittelt der an die Festkörper-Kamera angeschlossene Rechner z. B. den Schwerpunkt des dunklen Feldes (also der Pupille) oder auch den Rand der Pupille, so daß die Ermittlung der Augenbewegungen unabhängig ist vom momentanen Pupillendurchmesser. Mit anderen Worten: Der Pupillendurchmesser kann sich während des Eingriffs ändern, ohne daß die Messung und die Strahlnachführung beeinträchtigt wird. Die Bildverarbeitung ermöglicht auch eine zusätzliche visuelle Überwachung durch die Bedienungsperson.

Um eine optimale Anpassung der Strahlnachführung an die Pulsfolgefrequenz des Lasers zu erreichen, wird die Bildaufnahme- oder Bildfolgefrequenz  $f_B$  deutlich größer als die Pulsfolgefrequenz  $f_P$  des Bearbeitungslasers gewählt, insbesondere mindestens etwas mehr als zweimal so groß, damit zwischen zwei Laserpulsen mindestens zwei Bilder erzeugt und verarbeitet werden können, aus denen eine mögliche Bewegung des Auges ermittelt werden kann, so daß der nachfolgende Laserpuls bereits entsprechend der Augenbewegung nachgeführt werden kann.

Fortgeschrittene PRK-Systeme ermöglichen eine Verkleinerung des Durchmessers des Laserstrahlflecks für die Ablation. Mit "Spots" kleineren Durchmessers können feinere und kompliziertere Formungen des zu bearbeitenden Materials, z. B. der Cornea, vorgenommen werden. Eine Verkleinerung des Fleckdurchmessers erfordert aber eine erhöhte Pulsfolgefrequenz (Repetitionrate) des Lasers, damit die Behandlungszeit nicht unnötig verlängert wird. Die Erfindung sieht vor, daß bei einer Änderung der Pulsfolgefrequenz auch die Bildfolgefrequenz entsprechend angepaßt wird, insbesondere proportional, d. h. bei einer Verdoppelung der Pulsfolgefrequenz wird auch die Bildfolgefrequenz verdoppelt, so daß immer gewährleistet ist, daß zwischen zwei Laserpulsen jeweils zumindest zwei Bilder geschossen werden, aus deren Vergleich eine Augenbewegung ableitbar ist, um gegebenenfalls einen entsprechenden Befehl an die Steuerung des Laserstrahls zum Nachführen zu geben. Insbesondere sieht die Erfindung vor, daß die Pulsfolgefrequenz  $f_P$  der für die Ablation verwendeten Laserstrahlung größer als 100 Hz ist. Die Bildfolgefrequenz  $f_B$  ist dann entsprechend größer als 200 Hz und beide Frequenzen können synchron variiert werden, zum Beispiel die Repetitionsrate im Bereich von 100 bis 400 Hz und die Bildfolgefrequenz entsprechend im Bereich von 200 bis 800 Hz. Zu einer Pulsfolgefrequenz (Repetitionrate) des materialbearbeitenden Lasers von 100 Hz kann auch eine Bildfolgefrequenz von 250 Hz gewählt werden.

Wird die Pulsfolgefrequenz des Materialbearbeitungslasers relativ niedrig gewählt, muß die Bildfolgefrequenz nicht notwendig streng proportional folgen, vielmehr kann es genügen, die Bildfolgefrequenz langsamer abzusinken. Bei im Vergleich zur Repetitionsrate des Lasers hoher Bildfolgefrequenz kann eine gute Auflösung der Bewegung des Objektes erreicht werden. Wichtig ist, daß in jeder Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bearbeitungslaserpulsen jeweils hinreichend viele Bildaufnahmen gemacht werden (mindestens zwei), damit aus einem Vergleich aufeinanderfolgender Bilder auf eine Augenbewegung geschlossen werden kann und der Laserstrahl bei Bedarf bereits im nächsten Schuß nachgeführt werden kann.

Eine bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung, insbesondere bei Anwendung in der PRK, sieht vor, daß der auf das zu bearbeitende Objekt gerichtete Laserstrahl für die Materialbearbeitung auf dem Objekt die Form eines Sechsecks hat, insbesondere die Form eines regelmäßigen Sechsecks mit gleichen Kantenlängen. Eine solche Form des Laserflecks auf dem zu bearbeitenden Objekt (insbesondere der Cornea) ermöglicht einen besonders gleichmäßigen Materialabtrag (Ablation), und zwar sowohl bei überlappendem als auch bei jeweils angrenzend versetzter Führung des Laserstrahls über das Objekt (das oben genannte spot-scanning).

Bei überlappendem Führung der einzelnen Laserflecken auf dem zu bearbeitenden Objekt ist die Intensitätsverteilung im Laserfleck zu berücksichtigen. Ist das Intensitätsprofil des Laserstrahls im abgebildeten Fleck nicht weitestgehend "top flat", d. h. rechteckförmig, sondern mit einem merklichen Anstiegsgradienten, z. B. trapezförmig oder gaussförmig, so wird die Überlappung der einzelnen Laser-

Spots entsprechend so gesteuert, daß insgesamt ein gleichmäßiger, homogener Materialabtrag erfolgt. Auch für diese Verhältnisse ist die Sechseckform des Spots günstig.

Nachfolgend wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 schematisch eine Vorrichtung für die Materialbearbeitung mit gepulster Laserstrahlung und

Fig. 2 schematisch die Form eines bevorzugten Laserstrahlungsflecks (spot) auf einem zu bearbeitenden Objekt, wie der Hornhaut.

Die in Fig. 1 schematisch gezeigte Vorrichtung dient dazu, ein Objekt 10 mit Laserstrahlung zu bearbeiten. Bei dem Objekt 10 kann es sich zum Beispiel um die Cornea des menschlichen Auges handeln. Ein Laser 12 erzeugt die für die Ablation des Materials erforderliche Laserstrahlung, zum Beispiel ein Er: YAG-Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 2,94  $\mu\text{m}$ .

Die Laserstrahlung wird mittels eines galvanometrischen Abtasters (Scanner) 14 umgelenkt und der umgelenkte Laserstrahl 16 wird auf das Objekt 10 gerichtet.

Koaxial mit dem Laserstrahl 10 wird ein weiterer Strahl 32 einer sogenannten Fixierlichtquelle 18 auf das Objekt gerichtet. Der Strahl 32 definiert eine Bezugsachse A, die im Raum ortsfest ist. Im Idealfall bewegt sich das Objekt 10 nicht in bezug auf die Achse A. Dann braucht der Bearbeitungsstrahl 16 nicht nachgeführt zu werden.

Im Realfall bewegt sich jedoch das Objekt 10 in bezug auf die Achse A. Um in diesem Fall den Bearbeitungsstrahl 16 entsprechend den Bewegungen des Objektes 10 nachzuführen, wird das Objekt 10 mit Infrarotstrahlung (nichtgezeigt) beleuchtet, und mittels einer CCD-Kamera 20 werden Bilder aufgenommen, und zwar mit einer Bildfolgefrequenz  $f_B$ . Die die Bilder in der Kamera 20 erzeugende Strahlung ist in Fig. 1 schematisch mit dem Bezugszeichen 24 angedeutet. Ist das Objekt 10 ein menschliches Auge, so nimmt die Kamera 20 fortlaufend Bilder der Pupille auf, um durch einen Hell/Dunkel-Vergleich die Lage der Pupille unabhängig von deren Durchmesser zu ermitteln, d. h. es wird der Mittelpunkt der Pupille durch Kontrastvergleich ermittelt. Hierzu werden die Ausgangssignale 26 der Festkörper-Kamera 20 in eine mit einem Rechner versehene Bildverarbeitungseinrichtung 22 eingegeben.

Ist die Pulsfolgefrequenz  $f_P$  der Laserstrahlung 16 vorgegeben, so wird die Bildfolgefrequenz  $f_B$  mit der mittels der Kamera 20 Bildaufnahmen gemacht werden, so gewählt, daß zwischen zwei Laserpulsen 16 mindestens zwei Bilder erzeugt werden, um eine Bewegung des Objektes 10 relativ zur Achse A zu ermitteln. Dies leistet die Bildverarbeitungseinrichtung 22 mit als solches bekannten Bildverarbeitungs-algorithmen. Ermittelt die Bildverarbeitungseinrichtung 22, daß sich das Objekt 10 relativ zur Achse A um mindestens einen vorgegebenen Betrag verschoben hat, wird ein entsprechendes Signal an eine Steuerung 30 abgegeben, die den galvanometrischen Abtaster 14 steuert. Der Abtaster 14 spiegelt den vom Laser 12 kommenden Strahl und kann somit durch Veränderung seiner Stellung die Position ändern, in der der Strahl 16 auf das Objekt 10 trifft. Zum Nachführen des Strahls 16 entsprechend einer Relativverschiebung zwischen Objekt 10 und Achse A gibt die mit einem Mikroprozessor versehene Steuerung 30 ein entsprechendes Stell-signal 28 an den galvanometrischen Scanner 14.

Der Scanner 14 steuert den Lichtfleck 40 auf dem Objekt 10 gemäß einem von der Steuerung 30 ausgeführten Abtastalgorithmus, gemäß dem der Fleck sukzessive über die abzutragende Fläche geführt wird, und zwar derart, daß letztlich eine gewünschte, ortsabhängige Schichtdicke abgetragen wird, um das Material, wie gewünscht, neu zu formen.

Fig. 2 zeigt eine bevorzugte Form eines insbesondere

nach Fokussierung auf dem Objekt 10 abgebildeten Laserstrahls 16, nämlich ein regelmäßiges Sechseck mit konstanter Kantenlänge. Ein solcher Fleck auf einem zu bearbeitenden Objekt ermöglicht bei Verschiebung einen gleichmäßigen (homogenen) Materialabtrag, sowohl bei überlappendem Betrieb als auch bei quasi flächendeckender Aneinanderreihung sukzessiver Laserpulse, was in Fig. 2 durch gestrichelte Flecken 40' und 40'' angedeutet ist.

Fig. 2 zeigt auch, daß sich bei Verwendung von regelmäßigen Sechsecken als Form des Laser-Spots eine sogenannte hexagonale Abtaststruktur ergibt, d. h. die Mittelpunkte M der einzelnen Sechsecke, die nacheinander auf dem Objekt abgebildet werden, liegen selbst auf einem Sechseck, das in Fig. 2 gestrichelt dargestellt ist.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung für die Materialbearbeitung mit einem gepulsten Laser (12), dessen Pulsfolgefrequenz ( $f_p$ ) einstellbar ist und dessen Strahl (16) auf das zu bearbeitende Objekt (10) gerichtet wird, und mit einer Einrichtung (14, 20, 22, 30) zum Nachführen des Strahls (16) dann, wenn sich das Objekt (10) relativ zu einer Bezugsachse (A) bewegt, wobei die Einrichtung zum Nachführen eine Bildaufnahmeeinrichtung (20), die das Objekt (10) mit einer Bildfolgefrequenz ( $f_B$ ) aufnimmt, eine Bildverarbeitungseinrichtung (22), die aufeinanderfolgende Bilder verarbeitet, um die Bewegung des Objektes (10) zu ermitteln, und eine Steuerung (30) zum Abgeben eines einer Objektbewegung entsprechenden Signals (28) an eine optische Einrichtung (14) zum Steuern des Laserstrahls (16) aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß bei einer Änderung der Pulsfolgefrequenz ( $f_p$ ) in Bereichen größer als 100 Hz die Bildfolgefrequenz ( $f_B$ ) synchron dazu veränderbar ist, wobei die Bildfolgefrequenz ( $f_B$ ) immer mindestens zweimal so groß ist wie die Pulsfolgefrequenz ( $f_p$ ).
2. Vorrichtung nach Anspruch 1 zur Formung des Objektes in Form der Cornea des Auges, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Bildverarbeitung zur Ermittlung einer Bewegung der Cornea das Zentrum der Pupille ermittelt und dessen Bewegung festgestellt wird.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 zur Formung des Objektes in Form der Cornea des Auges, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Bildverarbeitung zur Ermittlung einer Bewegung der Cornea der Rand der Pupille ermittelt und dessen Bewegung festgestellt wird.
4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Strahl in Form eines Sechsecks (40, 40', 40'') auf das zu bearbeitende Objekt abgebildet wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

55

60

65

- Leerseite -

Fig. 1

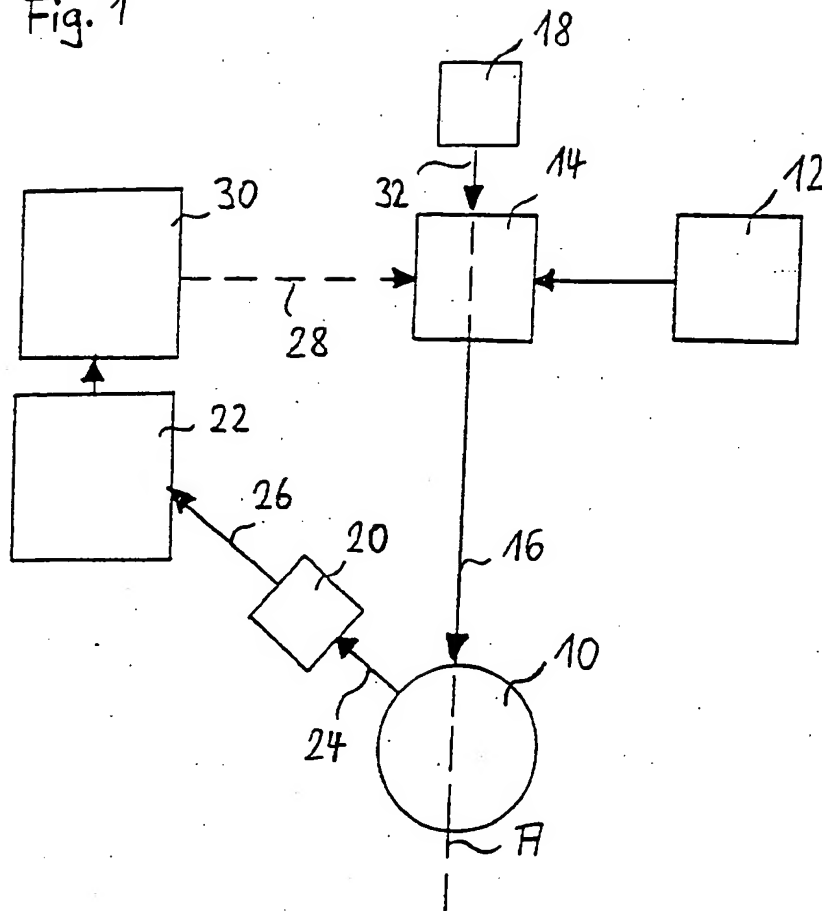


Fig. 2

